

微小真空冷陰極アレイを用いた高い放射線耐性を持つ 小型軽量撮像素子の開発

(受託者) 国立大学法人京都大学

(研究代表者) 後藤康仁 大学院工学研究科

(再委託先) 国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立大学法人静岡大学、
独立行政法人国立高等専門学校機構木更津工業高等専門学校(平成 26 年度～)

(研究期間) 平成 25 年度～27 年度

1. 研究の背景とねらい

福島第一原子力発電所の廃炉作業における燃料デブリの取り出し工程において、高い線量率の放射線環境下で長時間動作することのできるカメラが必要とされている。通常用いられる半導体方式の撮像素子は小型であるが耐放射線性能が低く、この用途には適さない。ビジコンやカルニコンといった真空方式の「撮像管」は耐放射線性能では実績があるが、大型であることや消費電力が大きいことから、限られた経路から燃料デブリにアクセスをせざるを得ないロボットに搭載するのは難しい。このような背景から、半導体方式の撮像素子のように小型で、撮像管のように高い耐放射線性能を持つ撮像素子の開発が望まれている。

撮像管の大きさや消費電力の問題は、電界電子放出機構に基づく微小真空冷陰極アレイ (FEA) を用いれば解決することができると考えられる。FEA は微細加工を用いて微小な電子銃を 2 次元的に配列したもので、これを使用すれば電子ビームを走査する空間を必要としないため薄型化(10 mm 以下)が可能となる。また、電界電子放出においては陰極の加熱を必要とせず、電力効率はほぼ 100%である。このような素子(撮像板と呼ぶ)が十分な耐放射線性を持てば、廃炉作業で利用することのできる小型軽量の撮像素子の実現できるものと考えられる。撮像板はこれまで日本放送協会

(NHK) が超高感度撮像素子として開発を進めてきた⁽¹⁾。しかしながら、耐放射線性能については調べられていない上に、光信号を蓄積する光電変換膜がアモルファスセレンであり耐熱性が低いことなどからそのままでは廃炉作業に用いることはできない。また、電子銃から放出される電子ビームが大きく発散することから、撮像素子を取り囲むような大きな永久磁石を設置する必要がある、小型化の点でも難点がある。本研究ではこれらの課題すなわち、

- (1) 永久磁石を使用せずとも光信号検出を行うことのできる静電集束型の FEA の開発
- (2) FEA・光電変換膜、またそれらを組み合わせた撮像素子の 1 MGy までの耐放射線性の確認を行うことで、耐放射線小型軽量撮像素子に求められている課題を解決することを目的とした。

2. これまでの研究成果

2.1. 静電集束 FEA の開発

FEA に従来以上に強い集束効果を持つ静電レンズを作りこむことで電子ビームの発散を抑制することを試みた。エミッタ先端の電界強度に影響を与えることなく、放出された電子ビームを集束する構造として図 2 のような構造のものを考え、ゲート高さやフォーカス径などのパラメータ

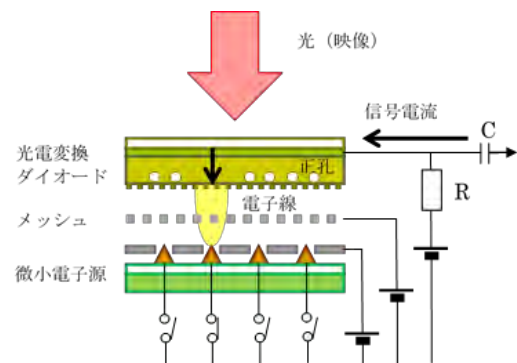


図 1. 微小真空冷陰極アレイを用いた撮像素子の概念図

を変化させて電子ビーム軌道計算を行い、最適な電極構造を求めた。図2は実際に作製した FEA の走査電子顕微鏡像である。軌道計算にはこの課題に特化したプログラムを開発した。数値解と解析表現を組み合わせることで、エミッタ表面の電界分布を精度良く計算する手法を開発した。その結果、ゲート先端の高さをエミッタ先端よりも高くすることでフォーカス電位によるエミッタ先端電位の低下を抑制することができること、またフォーカス径を変えても同様な集束特性は得られるが、フォーカス径を大きくすると逆極性の電位を与える必要があることなどの知見が得られた⁽²⁾。

軌道計算により得られた構造を実現するために、新たな FEA 作製プロセスを導入した。Spindt 型エミッタ作製プロセスと、エッチバックと呼ばれる手法を用いた作製プロセスを組み合わせ、図2で示した構造をもつ FEA を作製した。2次元の光信号を読み出すことのできるマトリクス構造とし、一画素の大きさとして $50\mu\text{m}$ のものを作製した。この一画素から放出された電子ビームの電流密度分布の評価を行った結果を図3に示す。図の横軸はフォーカス電極の電位であり、電子ビーム径(半値全幅で定義)とそのときの電流量を示している。最適なフォーカス電圧を与えることでビーム径を画素と同じ $50\mu\text{m}$ とすることができ、そのときの電子ビーム電流は光信号の読み出しに必要とされる $1\mu\text{A}$ 以上を実現した⁽³⁾。これにより、永久磁石を用いることなく撮像できる小型撮像素子実現の基盤技術を確立した。現在ではさらに小さい画素の FEA の試作へと進んでいる。

2.2. 光電変換膜の開発と模擬撮像板の試作

光電変換膜を選択する上では、廃炉作業時において懸念される温度上昇を考慮して禁制帯幅の広いテルル化カドミウム(CdTe)を基礎としたダイオードを選択した。CdTeを用いたダイオードは太陽電池として実用化されており、高い可視光感度を有するとともに、放射線検出器としての利用も進んでおり、耐放射線性も高い。逆に言えば放射線に対する感度も有するが、その場合、数百 μm といった単位の厚みを必要とする。可視光の検出には $1\mu\text{m}$ 程度の膜厚があれば良いことから、十分利用可能であると判断した。近接昇華法および化学気相成長法で作製した CdTe/CdS ダイオードに二次電子放出比抑制膜となる二硫化アンチモン(Sb_2S_3)をアルゴンガス中で成膜し、光電変換膜を作製した⁽⁴⁾。作製した光電変換膜の光信号検出能力を確認するために、熱陰極を用いた撮像管評価用装置を用いた撮像実験を行い、二次元像を得ることができることを確認した。また、電子線源を FEA とした場合でも光信号の検出が可能であることを確認した。上記の結果を受けて、FEA と光電変換膜、メッシュを組み込んだ模擬撮像板を小型真空容器に封入したものを作製し、以下で述べるガンマ線照射前後における光電流検出機能の変化の評価に供した。

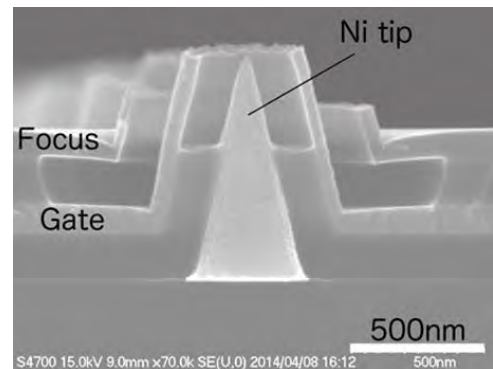


図2. 検討した FEA の基本電極構成

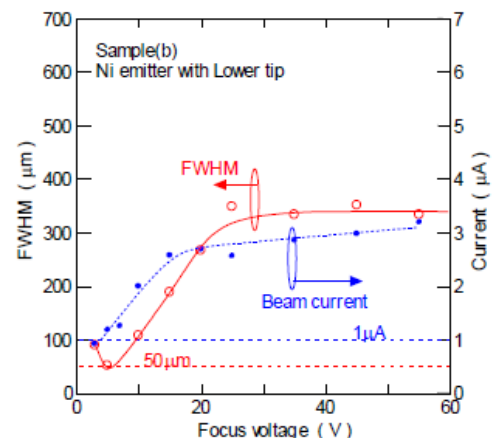


図3. 静電集束 FEA のビーム径および電流量のフォーカス電位依存性

2.3. 材料・デバイスの耐放射線性評価

今回提案した材料・構成要素の耐放射線性について以下のように評価した。まず、FEA および光電変換膜に断続的にガンマ線照射を行い、照射と照射の間で素子の特性評価を行うことで、ガンマ線照射による素子の特性の変化ないしは劣化を検証した（材料の耐放射線性評価）。次に、FEA や光電変換膜の動作中に放射線が及ぼす影響を調べることで、撮像素子として放射線環境下で動作することができるかどうかを検証した（光検出素子特性の耐放射線性評価）。

材料の耐放射線性評価においては、ガンマ線照射にはコバルト 60 を線源として使用した。一回の照射は 100 kGy から 200 kGy 程度とし、それらを繰り返すことで、累積で 1.2 MGy 程度の吸収線量となるまで評価を行った⁽⁵⁾。図 4 に FEA の電流電圧特性の変化を示す。FEA から放出される電流をアノードで受ける三極管構造で測定を行った。1.2 MGy 程度までの照射によっても、アノード電流の減少は見られなかった。また、FEA で懸念されるのは、エミッタ・ゲート間の絶縁膜の劣化であるが、ゲート電流の増加も見られず、絶縁膜の劣化も見られなかった。図 5 には CdTe/CdS ダイオードの光起電力特性の変化を示す。最初の 75 kGy の照射での短絡電流および開放電圧の低下は、ガラス基板の着色によるものであることを確認した。模擬撮像板は、1 MGy のガンマ線照射後の光信号の検出特性を評価し、問題なく光信号検出できることを確認した⁽⁶⁾。図 6 に照射後の光検出特性を示す。

素子特性の耐放射線性評価においては、FEA と光電変換膜で異なる線源を用いた。FEA については、1 MeV 電子線をタングステンターゲットに照射して得られる制動放射エックス線を照射したときの電子放出特性の変化を観察した。0.5 kGy/h 程度の線量率のエックス線環境下においても、FEA の電子放出特性には変化は見られなかった。CdTe/CdS ダイオードについては異なる線量率のガンマ線に曝されたときに流れる光励起電流を測定した。線量率の調整は、線源から試料までの位置を変えることで行った。線量率の増加に対して流れる電流は直線的に増加し、ガンマ線に対する感度があることを示した。ガンマ線による励起電流は無バイアス時で 1 kGy/h 程度の線量率で -100 nA であり、室内の光を照射した場合と比較すると極めて少なかった。

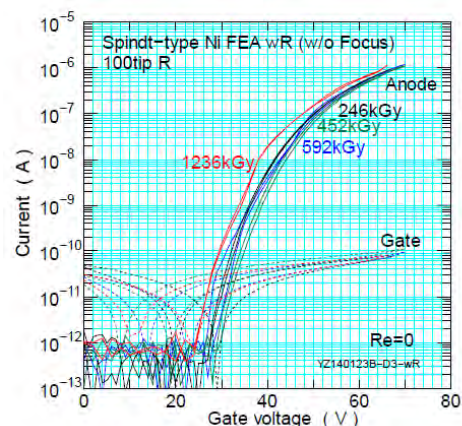


図 4. ガンマ線照射に伴う FEA の電流電圧特性の変化

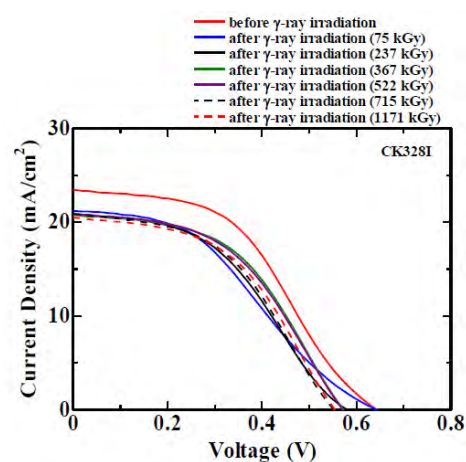


図 5 ガンマ線照射に伴う光電変換膜の光起電力特性の変化

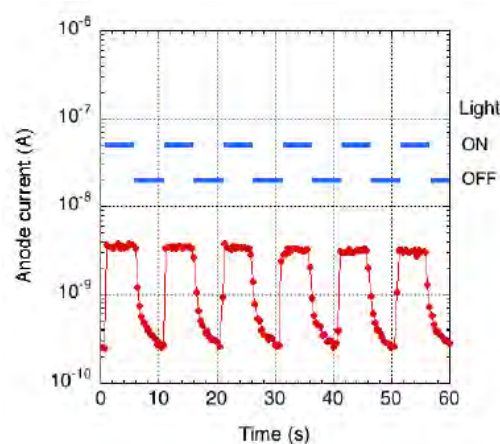


図 6 1 MGy 照射後の模擬撮像板の光検出特性

2.4. これまでに得られた成果のまとめ

1. 従来難しかった、静電集束のみによる発散電子ビームの集束を可能とし、永久磁石を必要としない小型軽量撮像素子のための電子源(一画素 $50\mu\text{m}$)を実現した。
2. CdTe をベースとした光電変換膜で 2 次元の光信号検出が可能であること、また FEA からの電子ビームを用いて光信号の検出ができることを確認した。
3. FEA と光電変換膜の 1.2 MGy までの耐放射線性を確認し、1 MGy 照射後であっても、模擬撮像板において光信号検出ができることを確認した。
4. エックス線照射下における FEA の電流電圧特性、およびガンマ線照射下における CdTe/CdS ダイオードの電流電圧特性を評価し、kGy/h レベルの線量率下であっても撮像することのできる可能性を示した。

以上の技術開発により、1 MGy 以上の耐放射線性を有し、なおかつ、永久磁石を必要としない小型軽量撮像素子を実現することができる目途が立った。

3. 今後の展望

今後は、今回開発した要素技術を結集して撮像素子を構成し、実際に像を得ること、また放射線照射下における撮像特性を検証することが必要である。撮像素子構成上、FEA の駆動回路を試作する必要がある。このような回路については、従来技術を転用することができることから実現は容易であると考えている。また、10 kGy/h に及ぶ線量率の放射線環境下あるいは高温環境であっても撮像の可能な手法についても具体的な検討を始めている。

4. 参考文献

- (1) Nanba, M., et al., “640×480 pixel active-matrix Spindt-type field emitter array image sensor with high-gain avalanche rushing amorphous photoconductor target”, J. Vac. Sci. Technol. B, 28, p.96 (2010)
- (2) Gotoh, Y., et al., “Evaluation of current density distribution of field emitted electrons by numerical simulation in conjunction with analytical approach”, Proc. 29th Int. Vacuum Nanoelectronics Conf. (IVNC2016), Vancouver, July 12-15, 2016, p.194.
- (3) Nagao, M., et al., “Beam profile measurement of volcano-structured double-gated Spindt-type field emitter arrays”, J. Vac. Sci. Technol. B 34, p.02G108 (2016)
- (4) Masuzawa, T., et al., “Development of CdTe based photoconductive target for a radiation tolerant compact image sensor”, Proc. 29th Int. Vacuum Nanoelectronics Conf. (IVNC2016), Vancouver, July 12-15, 2016, p.115.
- (5) Okamoto, T., et al., “Gamma-ray tolerance of CdS/CdTe photodiode for radiation tolerant compact image sensor with field emitter array”, Physica Status Solidi c, 13, p.635 (2016)
- (6) Gotoh, Y., et al., “Radiation tolerance of compact image sensor with field emitter array and cadmium telluride-based photoconductor”, Proc. 29th Int. Vacuum Nanoelectronics Conf. (IVNC2016), Vancouver, July 12-15, 2016, p.20.